离心叶轮掉块分析研究

刘昌标[1]，赵小全[2]，刘丽玉[3]，吉晓乐[1]

1.中国航发常州兰翔机械有限责任公司　江苏常州　213000
2.陆军装备部航空军事代表局驻上海地区航空军事代表室　江苏常州　213000
3.中国航发北京航空材料研究院　北京　100095

摘要：某型发动机在外场使用过程中检查发现发动机运转异常，分解发动机检查发现离心叶轮轮毂位置出现掉块。通过对断裂叶轮断口宏观、微观分析，金相组织、硬度检查，分析认为离心叶轮的断裂性质为高周疲劳，疲劳断裂的原因是在发动机服役环境下离心叶轮轮毂前端面产生腐蚀，在振动应力下开裂掉块。对离心叶轮轮毂位置采取涂漆保护措施后，未再发生此类故障。

关键词：离心叶轮；断口；疲劳断裂；振动；腐蚀

1　序言

在工程机构和机械设备中，疲劳失效的现象极为广泛[1]。机械零件的破坏有50%～90%为疲劳破坏[2]。航空发动机离心叶轮受气动和高速转动离心力等工作环境的影响产生疲劳裂纹的现象时有发生，裂纹扩展掉块会打伤其他工作部件，甚至引发严重事故。因此研究离心叶轮疲劳失效尤为重要。在对影响离心叶轮疲劳失效的多种因素研究中，多数情况下关注零件材质冶金缺陷、加工工艺、设计结构等，往往忽略环境因素的影响。因此，研究影响离心叶轮疲劳失效的因素对预防叶轮失效有重要的工程意义。

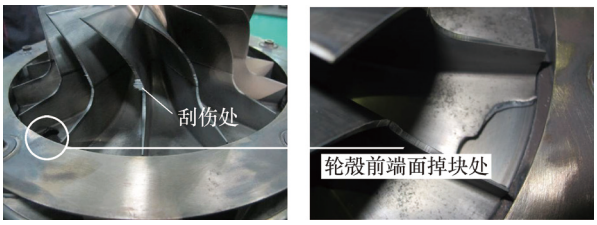
某型发动机在外场使用过程中检查发现发动机运转异常，分解发动机检查发现离心叶轮轮毂位置出现掉块。截止故障发生时，发动机累计工作时间为972h53min。

离心叶轮材料为2Cr13不锈钢，硬度要求28~35HRC。本文对离心叶轮断裂部位进行了宏微观分析，得出了断裂性质，确定了叶轮的断裂原因。

2　试验过程

2.1　离心叶轮外观检查

此型机离心叶轮为导风轮及离心叶轮粘接结构，整个叶轮上共有16片叶片，叶轮在某两叶片间的轮毂部位发生掉块，掉块一侧连续数片叶片在导风边部位存在明显刮伤痕迹，如图1所示。在掉块相邻的连续两个叶片叶背侧叶根附近各存在一条径向裂纹，如图2所示。裂纹扩展路径和掉块断口径向扩展段相似，且在裂纹末端也出现往周向扩展的弧形拐弯。在图1、图2中还可看到，叶轮前端面表面存在较密集的黑点甚至麻坑，而后端面较光亮，为正常的机加工表面。



a）刮伤处　　b）轮毂前端面掉块处

图1　离心叶轮损伤形貌

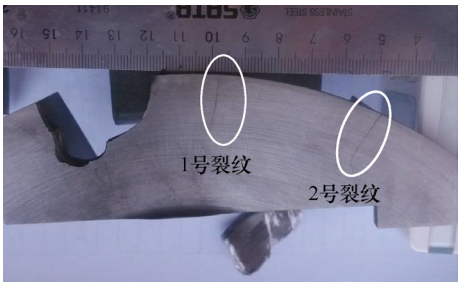


图2　轮毂掉块及相邻的裂纹位置宏观形貌

2.2 离心叶轮掉块断口观察

按掉块扩展路径，将断口大致分为三段：第一段为沿叶片叶根径向扩展的径向断面1，扩展长约17mm，为裂纹扩展前中期；第二段为周向扩展的周向断面，为裂纹扩展中后期，另一侧的径向断面2为瞬断区，可看到收集到的掉块残片与掉块缺口基本匹配，除打弯及磨损外未出现明显的缺失，如图3所示。

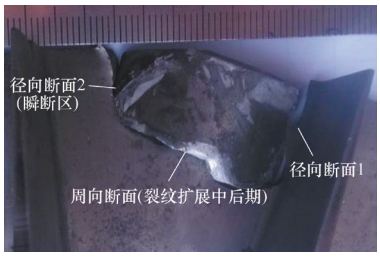


图3 掉块断口扩展走向

从断口断面上观察，径向断面1呈现两个弧形扩展台阶面，两个台阶面平坦，仅见个别大弧线，两个台阶面的疲劳分别起源于距外缘约3.5mm和13.6mm的轮毂前端面两处位置，沿厚度方向往后端面扩展，如图4所示。其中源1区域可见数个小点源，疲劳点源处均可见深约50μm的腐蚀坑，如图5

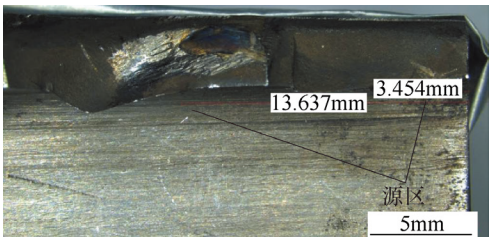
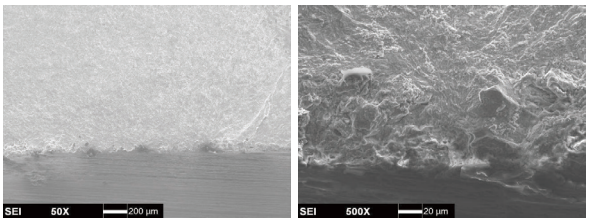
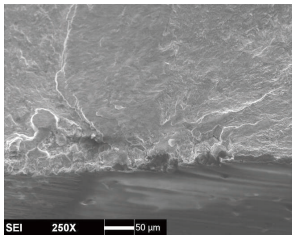


图4 掉块断口宏观形貌



a）源1 低倍　　b）源1某点源高倍



c）源2高倍

图5 源区特征

所示。扩展区可见细密的疲劳条带，如图6所示，瞬断区为典型的韧窝形貌[3]，如图7所示。

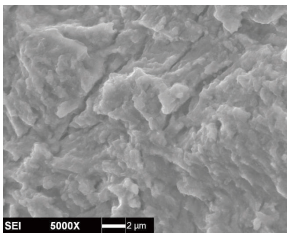


图6 弧线间的疲劳条带

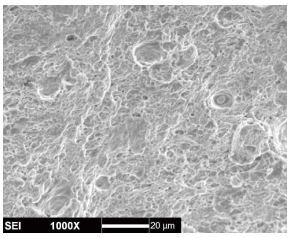
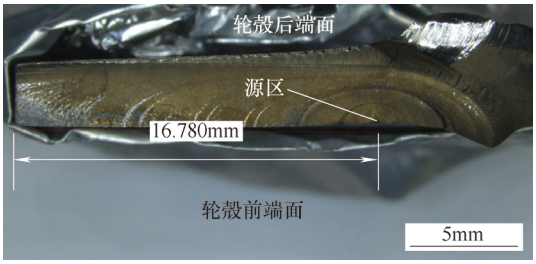


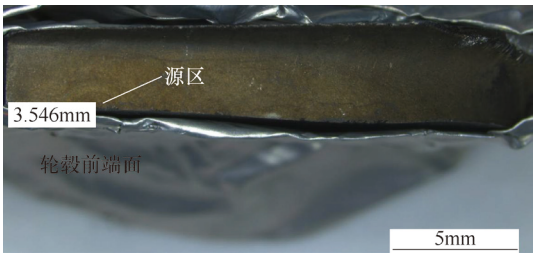
图7 瞬断区韧窝形貌

2.3 裂纹断口观察

1#裂纹打开后整个裂纹断口上均可见清晰的大小弧线，疲劳起源于距外缘16.8mm处的轮毂前端面，2#裂纹打开断口与掉块断口径向断面特征相似，断面平坦，弧线特征不如1#裂纹断口明显，明显的一处的源区位置位于距外缘约3.5mm处的轮毂前端表面，如图8所示。源区可见数个点源，均有腐蚀特征，如图9、图10所示。

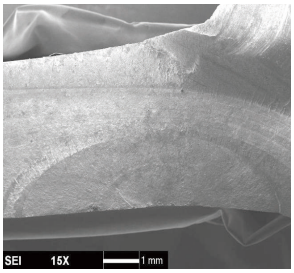


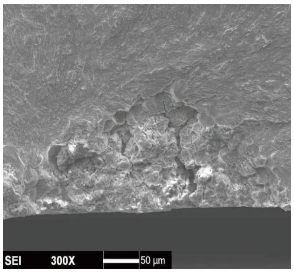
a）1#裂纹断口宏观形貌



b）2#裂纹断口宏观形貌

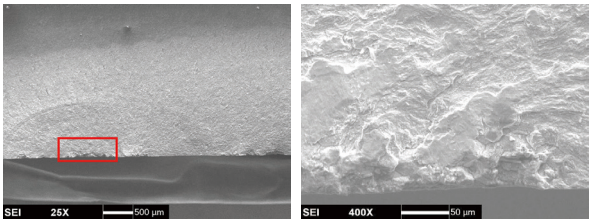
图8 裂纹断口宏观形貌





a）1#裂纹源区低倍特征　　b）1#裂纹源区高倍特征

图9 1#裂纹源区特征



a）2#裂纹源区低倍特征　　b）2#裂纹源区红色方框内高倍特征

图10　2#裂纹源区特征

1#裂纹和2#裂纹断口疲劳扩展区疲劳条带宽度与掉块断口相当，如图11所示。

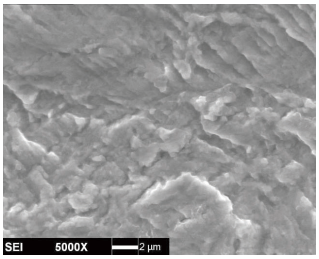
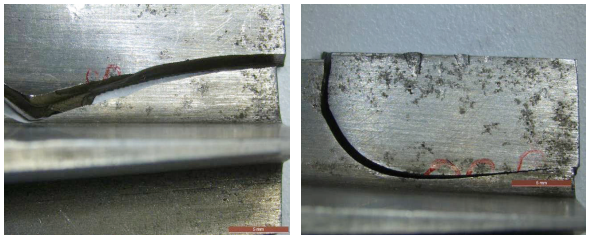


图11　裂纹断口疲劳扩展区条带

2.4　离心叶轮表面腐蚀形貌观察

离心叶轮掉块和裂纹断口源区均可见明显腐蚀现象，如图12所示。



a）1#裂纹位置　　b）2#裂纹位置

图12　叶轮轮毂前端面上的麻点

扫描电镜下观察，在叶轮轮毂前端面宏观观察到的明显麻点处大多可见沿晶腐蚀坑，如图13所示。而轮毂后端面则为原始的加工表面。

对断口表面的腐蚀坑进行能谱分析，腐蚀坑内可检测到较高的腐蚀介质Cl^-，如图14所示，检测结果见表1。

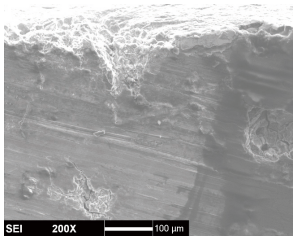


图13　断口附近轮毂前端面的腐蚀坑

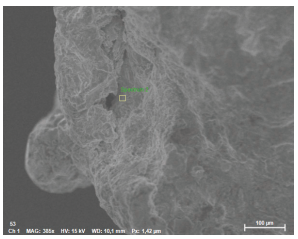


图14　腐蚀坑能谱检测

表1　腐蚀坑能谱检测结果

元素	原子数	质量分数（%）	原子分数（%）
O	8	11.48	30.67
Al	13	0.44	0.69
Cl	17	0.30	0.36
K	19	0.27	0.30
Cr	24	17.52	14.40
Fe	26	69.99	53.57

2.5　组织及硬度检查

在2#裂纹断口下方截取金相试样（见图15）进行观察。

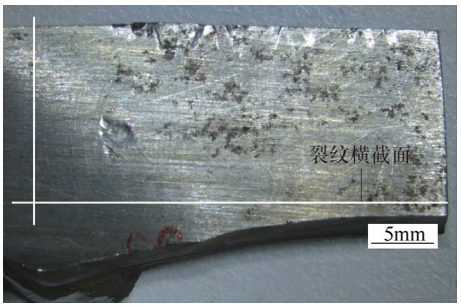
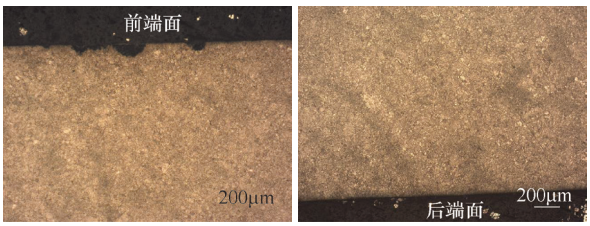


图15　金相试样取样

2#裂纹横截面金相检验，在轮毂前端面表面可见多处腐蚀黑斑，而后端面表面未见“黑斑”，如图16所示。金相试样腐蚀前后，均可见黑斑沿晶腐蚀现象，基体组织未见异常，如图17所示。



a）前端面表面腐蚀“黑斑”　　b）后端面表面未见“黑斑”

图16　前后端面表面腐蚀情况

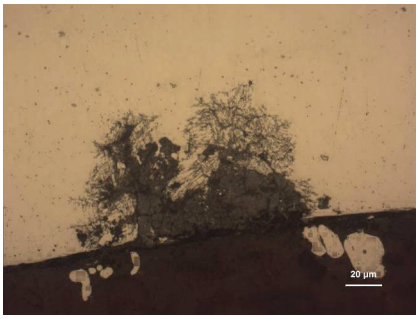


图17　“黑斑”形貌

对2#裂纹附近及完好轮毂附近基体进行维氏硬度检测，两者硬度无明显差异，且均符合技术条件要求，见表2。

表2　离心叶轮轮毂硬度检查

项目	维氏硬度HV				换算为洛氏硬度HRC	技术条件HRC
	1	2	3	均值		
2#裂纹位置	319	319	320	319	32	28~35
完好轮毂	317	321	315	318	32	

3　分析与讨论

离心叶轮轮毂掉块与裂纹位置及扩展路径相似，掉块和裂纹打开断口平坦，宏观均可见疲劳弧线，微观均可见细密的疲劳弧线，疲劳扩展充分，掉块和两条裂纹同模失效，失效性质为高周疲劳掉块（裂纹）[4]。离心叶轮掉块和裂纹均起源于靠近叶片叶根的轮毂前端面，失效位置组织及硬度未见异常，源区未见冶金缺陷，掉块和开裂的原因与材质无关。零件发生高周疲劳失效往往与振动有关，掉块和裂纹位于连续的4个叶片间的轮毂处，位置集中，从分布上看具有节径型共振的特点。此外，掉块和裂纹呈现多个点源特征，且每个源区均可见不同程度的腐蚀现象，说明源区腐蚀对裂纹的萌生具有明显的促进作用。源区检测出较多的Cl元素，该型发动机是在远海服役，叶轮轮毂前端面的腐蚀元素Cl应是来源于发动机的服役环境。

因此，发动机离心叶轮轮毂掉块和裂纹的产生原因是轮毂表面存在严重的腐蚀，在振动应力下产生裂纹及掉块。

2Cr13为马氏体型不锈钢[5]，虽然该型不锈钢在大气环境中具有较好的耐蚀性，但在含氯离子溶液中，2Cr13钢表面的钝化膜容易溶解[6]，氯离子对金属材料的腐蚀有两个方面的作用[7, 8]：一是氯离子破坏金属的钝化膜，使材料发生点蚀；二是氯离子直接参与金属材料的阳极溶解过程，导致基体产生腐蚀。

为了提高离心叶轮的防腐性能，防止再出现类似问题，对叶轮轮毂部位进行涂漆保护。后续交付的发动机在外场服役过程中未再出现此类问题。

4　结束语

1）发动机离心叶轮断裂性质为高周疲劳，掉块及裂纹均起源于叶轮轮毂表面的腐蚀坑，呈多个点源特征。

2）发动机离心叶轮轮毂掉块和裂纹的原因是轮毂表面存在严重的腐蚀，在振动应力下产生疲劳裂纹及掉块。

3）对轮毂部位采取涂漆保护措施后，未再发生此类故障。

参考文献：

[1] 钟群鹏，赵子华.断口学[M].北京：高等教育出版社，2014：242-243.

[2] 黄宁.大型结构件的疲劳寿命预测方法研究[D].长沙：中南大学，2013：10-11.

[3] 姜锡山，赵晗.钢铁显微断口速查手册[M].北京：机械工业出版社，2010：85.

[4] 张栋，钟培道，陶春虎.失效分析[M].北京：国防工业出版社，2010：114-132.

[5] 《中国航空材料手册》编辑委员会.中国航空材料手册[M].北京：中国标准出版社，2002：437.

[6] 韦云汉.2Cr13在浓盐酸中的腐蚀行为研究[J].广州化工，2012（3）：60-62.

[7] KOLMAN D G，FORD D K，BUTT D P，et al. Corrosion of 304 stainless steel exposed to nitric acid chloride environment[J].Corrosion Soc.1997，39：2067.

[8] 查全性.电极过程动力学导论[M].北京：科学出版社，1978：448.

MW 20210714

（上接第82页）

参考文献：

[1] 全国阀门标准化技术委员会.通用阀门 碳素钢铸件技术条件：GB/T 12229—2005 [S].北京：中国标准出版社，2005.

[2] 闫超鹏，孙锋，单爱党，等.超超临界火电机组用铁素体耐热钢的研究现状[J].机械工程材料，2008，32（12）：1-4.

[3] MORAVEC Jaromir，NOVALOVA Iva，SOBOTKA Jiri，et al.Application possibilities of the low-temperature repairs on creep-resistance turbine components from material GX23CrMoV12-1[J]. MATEC Web of Conferences，2018，244.

MW 20210714